Document public

Outils de gestion des nappes superficielles : observatoire et outils d'évaluation des impacts de la géothermie

Volet 2 – Outils de gestion prédictive

Rapport final

BRGM/RP-63147-FR

Février 2014

S. Bezelgues-Courtade, Y. Vigier, F. Tertre, V. Hamm, S. Lopez

Avec la collaboration de

M. Analy, A. Naukenova

ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM (2013ENE10)

Ce document a été vérifié par : Vincent Mardhel Date : 14/02/2014

Approbateur :

Nom : Romain VERNIER Fonction : Dir. adj'int DGR Date : 11/03/14 Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots clés : Géothermie basse énergie, géothermie très basse énergie, pompe à chaleur, gestion

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bezelgues-Courtade S. Vigier Y. Tertre F. Hamm V. Lopez S. (2014) – Outils de gestion des nappes superficielles : observatoire et outils d'évaluation des impacts de la géothermie. Volet 2- Outils de gestion prédictive des ressources. Rapport provisoire. BRGM/RP-63147-FR, 40 p., 18 fig., 1 tabl., 1 ann.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les travaux récents en matière d'analyse des impacts potentiels de la géothermie de très basse énergie (assistée par pompe à chaleur) sur les eaux souterraines et le sous-sol ont mis en évidence un certain nombre de lacunes quant aux moyens disponibles pour encadrer cette filière, en plein essor et à forts enjeux, et lui assurer un développement durable, respectueux des différents usages et garant de la préservation quantitative et environnementale des ressources en eaux souterraines.

Un déficit d'outils opérationnels de gestion des ressources et usages énergétiques des eaux souterraines ressort en particulier.

C'est pourquoi, l'ADEME et le BRGM, dans le cadre de la convention nationale ADEME n°1205C0131, ont décidé de financer conjointement le présent projet dont l'objectif est de contribuer à développer deux types d'outils de gestion des aquifères exploités énergétiquement : l'observatoire des nappes et des outils de gestion prédictive des ressources.

Le présent rapport concerne le volet de développement d'outils de gestion prédictive des ressources.

Le programme 2013 a consisté à poursuivre le développement des outils analytiques initié en 2010 pour les aquifères monocouches à nappe libre et qui s'avèrent les plus pertinents pour des utilisateurs « non experts » (par exemple, les administrations chargées de la gestion des ressources en eau et du sous-sol). Ils permettent d'évaluer les perturbations des écoulements souterrains sous l'influence de nouvelles exploitations ainsi que des déplacements de fronts thermiques autour de forages d'injection. Ces outils pourront également trouver un intérêt auprès d'utilisateurs experts (bureaux d'études sous-sol) pour accéder rapidement à de premiers ordres de grandeur sur les impacts hydrauliques et thermiques (calcul de pré-évaluation) préalables au dimensionnement.

La poursuite de leur développement comprend :

- Leur interfaçage avec une base de données permettant de décrire les « paramètres du milieu » selon un maillage de l'aquifère. Ce complément permet d'affranchir l'utilisateur de la connaissance physique fine de l'aquifère concerné par le calcul d'impact ;
- sa traduction en langage de programmation Dot Net permettant de tester sa mise en ligne ;
- et le test de sa mise en ligne pour vérifier la possibilité de le diffuser via internet.

En complément aux outils précédents, en 2013, un code de calcul implémenté sous Python a été développé sur la base de la solution analytique proposée par Gringarten, Landel et Sauty (1974, 1975, 1978). Cet outil permet en plus du calcul du champ d'écoulement et du déplacement du front thermique, de calculer l'évolution de la température au puits de production. Il repose néanmoins sur un certain nombre d'hypothèses comme celle d'un aquifère avec des propriétés homogènes et isotropes (épaisseur, transmissivité) et il ne fonctionne que pour un écoulement permanent. D'autre part la version actuelle développée du code n'intègre pas à ce stade les échanges thermiques avec les épontes imperméables et donne donc des résultats plutôt pessimistes sur les températures de production (temps de percée plus courts et

décroissance plus marquée). L'évolution future sera l'intégration des échanges conductifs avec les épontes. Il pourra alors être proposé comme outil d'évaluation des impacts hydrauliques et thermiques aux bureaux d'études sous-sol en charge des études de faisabilité lors de la réalisation de nouveaux projets de géothermie sur aquifères captifs profonds ou superficiels. Par ailleurs, le développement d'un outil numérique utilisant un modèle conceptuel du réservoir similaire mais incluant l'hétérogénéité en termes d'épaisseur et de transmissivité constituera à terme un outil complémentaire pour une étude préliminaire plus poussée ou une étude d'interactions entre ouvrages.

Sommaire

1. Introduction 7

2. Outils de gestion prédictive d'aquifères à forte densité d'exploitations de très basse énergie 9

2.1. RAPPEL DES TRAVAUX ANTÉRIEURS 9

2.2. DÉVELOPPEMENTS 2013 10

2.2.1. Paramètres du milieu 10

2.2.2. Mise en ligne de l'outil : analyse de faisabilité 11

3. Outils de gestion prédictive d'aquifères à forte densité d'exploitations de basse énergie 19

3.1. INTRODUCTION 19

3.2. DESCRIPTION DU MODÈLE MATHEMATIQUE 19

3.2.1. Conditions de validité du modèle 19

3.2.2. Description du problème mathématique 19

3.2.3. Expression de la température en un point de l'aquifère 21

3.3. CALCUL DU CHAMP D'ECOULEMENT 23

3.3.1. Définition de la fonction potentiel complexe et vitesse complexe 23

3.3.2. Expression du potentiel complexe de l'écoulement 23

3.3.3. Calcul du champ d'écoulement 24

3.4. CALCUL DES ISOCHRONES ET DE LA TEMPERATURE DE PRODUCTION 26

3.4.1. Calcul des isochrones 26

3.4.2. Calcul de la température de production 28

3.5. RÉSOLUTION NUMÉRIQUE D'UN MODÈLE CONCEPTUEL 29

4. Conclusion 31

5. Bibliographie 33

Table des annexes

ANNEXE 1 : Méthode de calcul des impacts thermiques et hydrauliques dite des vecteurs vitesse……36

Liste des figures

Figure 1 : Architecture schématique de l'outil web 12

Figure 2 - Interface du démonstrateur web 14

Figure 3 - Bouton Ajouter un ouvrage 15

Figure 4 - Modification d'un ouvrage 15
Figure 5 - Bouton Lancer une simulation 15
Figure 6 - Résultat d'une simulation dans l'espace cartographique 16
Figure 7 : Résultat d'un scenario test à 21 ouvrages en service 17
Figure 8 : Schéma illustrant un tube de courant reliant un puits injecteur et producteur (d'après Gringarten et Sauty, 1975) 20
Figure 9 : Schéma d'évolution de la température en un point de l'aquifère avec et sans pertes thermiques dans les épontes (d'après Landel et Sauty, 1978). Si il n'y a pas diffusion au sein de l'aquifère les points de raccordement des deux courbes à l'axe des abscisses concordent. 21
Figure 10 : Courbe de recyclage d'un doublet thermique en fonction de la contribution des épontes (d'après Landel et Sauty, 1978) 22
Figure 11 : Exemple d'un doublet avec superposition de l'écoulement naturel de la nappe 24
Figure 12 : Schéma de principe du construction d'une ligne de courant 25
Figure 13 : Exemple du champ d'écoulement dans le cas de deux doublets et pour différentes configurations (A :pas d'écoulement régional, B :avec écoulement régional ($\beta = 0, vo = 1{,}4e-7m/s$), C :avec écoulement régional ($\beta = 180, vo = 1{,}4e-7m/s$), D : avec écoulement régional ($\beta = 180, vo = 1{,}4e-5m/s$), E : avec écoulement régional ($\beta = 50, vo = 1{,}4e-7m/s$), F : avec écoulement régional ($\beta = 210, vo = 1{,}4e-7m/s$) 26
Figure 14 : Exemple de tracé des isochrones superposés au champ d'écoulement pour deux doublets 28
Figure 15 : Evolution de la température de production aux puits d'après les paramètres du tableau 1 29
Figure 16 : Impact thermique du fonctionnement d'un doublet sur l'aquifère. Le puits injecteur est situé aux coordonnées (40,40), le puits producteur est positionné aux coordonnées (40,80). La température est représentée en variables adimensionelles. 30
Figure 17 : Mode d'application du calcul analytique. 39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres du modèle 27

1. Introduction

Les travaux récents en matière d'analyse des impacts potentiels de la géothermie de très basse énergie (assistée par pompe à chaleur) sur les eaux souterraines et le sous-sol ont mis en évidence un certain nombre de lacunes quant aux moyens disponibles pour encadrer cette filière, en plein essor et à forts enjeux, et lui assurer un développement durable, respectueux des différents usages et garant de la préservation quantitative et environnementale des ressources en eaux souterraines.

Un déficit d'outils opérationnels de gestion des ressources et usages énergétiques des eaux souterraines ressort en particulier.

Ce rapport présente les résultats du volet « outils de gestion prédictive des ressources exploitées en géothermie de basse à très basse énergie», le volet « Observatoire de nappes » est traité dans un second rapport (BRGM/RP-62946-FR).

Concernant la très basse énergie, le développement d'outils analytiques avait été initié sur support SIG[1] entre 2009 et 2011. Ils permettaient d'évaluer les perturbations des écoulements souterrains naturels induites par de nouvelles exploitations et tenant compte des exploitations existantes. Ils permettaient également d'estimer les rabattements ou surcotes de nappes autour d'ouvrages de prélèvement ou d'injection et les déplacements de fronts thermiques consécutifs. Ce type d'outil trouvant un écho favorable auprès des utilisateurs ciblés (administrations chargées de la gestion des ressources en eau souterraine), le BRGM et l'ADEME ont décidé, en 2013, d'en poursuivre le développement en améliorant leur exploitabilité. Pour ce faire, deux actions principales ont été réalisées :

- interfaçage de l'outil avec une base de données propre à l'aquifère considéré et renseignant les paramètres de calculs ;

- analyse de la faisabilité de la mise en ligne de l'outil.

Concernant les outils plus spécifiques pour la géothermie basse énergie, un code de calcul implémenté en Python relativement « simple » et très peu couteux en temps de calcul a été développé permettant d'accéder très rapidement au champ d'écoulement entre les puits, au tracé des fronts thermiques et de calculer la décroissance thermique aux puits de production. Il repose néanmoins sur un certain nombre d'hypothèses comme un aquifère avec des propriétés homogènes et isotropes (épaisseur, transmissivité) et ne fonctionne que pour un écoulement permanent. Par ailleurs la version actuelle développée du code n'intègre pas à ce stade les échanges thermiques avec les épontes imperméables et donne donc des résultats plutôt pessimistes sur les températures de production (temps de percée plus courts et décroissance plus marquée). L'évolution future sera l'intégration des échanges conductifs avec les épontes. Il pourra alors être proposé comme outil d'évaluation des impacts hydrauliques et thermiques aux bureaux d'études sous-sol en charge des études de faisabilité lors de la réalisation de nouveaux projets de géothermie sur aquifères captifs profonds ou superficiels. Le développement d'un outil numérique utilisant un modèle conceptuel du réservoir similaire mais incluant l'hétérogénéité en termes d'épaisseur et de transmissivité constituera à terme un outil complémentaire pour une étude préliminaire plus poussée ou une étude d'interactions entre ouvrages.

[1] SIG : Système d'Information Géographique

2. Outils de gestion prédictive d'aquifères à forte densité d'exploitations de très basse énergie

2.1. RAPPEL DES TRAVAUX ANTÉRIEURS

Le partenariat ADEME/BRGM de la période 2009-2010 a permis de développer de nouveaux outils d'évaluation des impacts prévisibles de la géothermie très basse énergie sur les aquifères superficiels à partir de l'association d'outils SIG et d'outils de calculs (numériques et analytiques).

Quatre outils permettant une évaluation des impacts hydrauliques et thermiques de l'exploitation géothermique des aquifères, la représentation cartographique à différentes échelles de ces impacts et l'archivage de ces données ont été développés :

- Deux outils associant SIG et modélisation numérique (prototypes 1 et 4) :
  - prototype 1 : les paramètres de calcul des impacts hydrauliques et thermiques ainsi que les résultats des calculs d'impacts sont fournis par un modèle numérique. Les résultats correspondent à une évaluation des rabattements/surcotes piézométriques associés aux scenarii d'exploitation simulés et à l'évaluation d'une variation de température d'aquifère induite par l'exploitation. Le SIG restitue les résultats de calcul, le pilotage du modèle et la définition des scenarii d'exploitation simulés,
  - prototype 4 : les paramètres de calcul des impacts hydrauliques et thermiques sont fournis par le modèle numérique (résultats de son calage). Ils sont redistribués à l'échelle souhaitée via le SIG. Le SIG réalise les calculs d'impacts (codification analytique). Ces calculs aboutissent à l'évaluation de rabattements/ surcotes associés aux scenarii d'exploitation simulés et à l'évaluation d'un déplacement de front thermique (non à l'évaluation d'une variation de température d'aquifère induite par l'exploitation).

  Ces outils (prototypes 1 et 4) sont inféodés au modèle numérique qui fournit les paramètres du milieu ce qui impose des contraintes à leur mise à disposition et une certaine complexité d'utilisation pour les utilisateurs de type « non experts ». Leur mise en œuvre est surtout intéressante quand des modèles hydrodynamiques préexistent. Ils ne peuvent qu'être associés à une exploitation par un utilisateur « expert ».

- Deux outils (prototypes 2 et 3) mettant en œuvre des méthodes de calcul purement analytiques :
  - Prototype 2 : couplage SIG/calcul analytique (vecteurs vitesse) ;
  - Prototype 3 : couplage SIG/calcul analytique (bulles thermiques) ;

  Ils ont été développés sous SIG et sont partiellement alimentés par l'utilisateur qui renseigne les paramètres de calcul propres au milieu (direction d'écoulement souterrain, vitesse d'écoulement souterrain, épaisseur moyenne saturée de l'aquifère). Les résultats des calculs correspondent à des estimations de perturbations d'écoulements souterrains sous l'influence de nouvelles exploitations et à des déplacements de fronts thermiques autour de forages d'injection.

  Ces outils, indépendants de modèles numériques, sont susceptibles d'être de bons supports d'aide à la décision, complémentaires d'analyses fines de préfaisabilité. Ils semblent pertinents pour les utilisateurs « non experts ». Ils peuvent aussi trouver une utilité pour des utilisateurs « experts », en pré analyse de situations. Ils sont

également susceptibles d'être aisément diffusables (via internet notamment). Des développements complémentaires restent cependant nécessaires : représentation d'isovaleurs, test d'autres codes de calculs pour aboutir au calcul d'isothermes, interfaçage avec des bases de données pour renseigner les paramètres de calcul et ne plus les laisser au choix de l'utilisateur ; traduction en langage de programmation C#.NET et test de mise en ligne.

Pour plus de détails sur chacun des outils, on pourra se référer au rapport « Outil d'évaluation de l'impact hydraulique et thermique de l'exploitation géothermique de très basse énergie des aquifères superficiels - année 2 - Rapport final, mars 2011 - BRGM/RP-59700-FR ».

Ces outils ont été présentés en 2012 à un comité d'utilisateurs potentiels constitués de gestionnaires des ressources en eaux souterraines de différents territoires (DREAL, DDT, Agence de l'Eau, conseils généraux et régionaux, communautés d'agglomérations…) ce qui a permis de mettre en évidence l'intérêt prédominant des outils analytiques pour l'identification d'incompatibilités flagrantes de certains projets avec la préservation de la ressource et de l'exploitation existante ou encore pour l'identification de projets nécessitant des expertises particulières.

Dans ce contexte, le BRGM a proposé de poursuivre en 2013 le développement d'un outil analytiques à partir du prototype 2 (vecteurs vitesses) pour les rendre accessibles aux utilisateurs ciblés (administrations chargées de la gestion des aquifères superficiels) en mettant l'accent sur :

- la représentation des résultats de calculs sous forme d'isovaleurs ;
- l'interfaçage avec une base de données relative aux paramètres du milieu ;
- l'accès via internet.

2.2. DÉVELOPPEMENTS 2013

La méthode de calcul analytique utilisée est celle dite des « vecteurs vitesse » (cf. annexe 1). Elle permet de calculer, au voisinage de l'ouvrage dont on souhaite estimer les impacts :

- la perturbation des lignes de courant caractérisant les écoulements souterrains résultante de l'influence conjointe du prélèvement ou de l'injection effectuée sur cet ouvrage, de la direction d'écoulement régional, et des prélèvements/injections effectués sur les ouvrages voisins ;
- le déplacement du front thermique dans le temps ;
- le rabattement (ou la surcote) de nappe résultant.

2.2.1. Paramètres du milieu

Les paramètres caractéristiques du milieu intervenant dans les calculs sont listés ci-dessous :

- Piézométrie moyenne ;
- Transmissivité ;
- Vitesse d'écoulement souterrain ;
- Direction d'écoulement souterrain.

Dans les versions antérieures de l'outil analytique, ces paramètres étaient renseignés par l'utilisateur au moment de réaliser le calcul d'impact.

Dans la version 2013 de l'outil analytique, ils sont pré-renseignés pour chaque maille d'un maillage carré kilométrique couvrant l'extension complète de l'aquifère considéré. Ils sont ainsi stockés sous forme d'une géodatabase (base de données géoréférencées) interfacée au code de calcul. L'utilisateur est donc affranchi de la connaissance précise et quantitative du contexte hydrogéologique local.

La base de données compte :

- Une table « Grille » décrivant les propriétés géométriques des mailles de la base ;
- Une table « OUVRAGES » décrivant les forages à considérer dans les calculs et leurs paramètres d'exploitation :
    - Nom de l'ouvrage ;
    - Nature de l'ouvrage ;
    - Localisation de l'ouvrage : coordonnées géographiques (x, y, maille de la grille à laquelle il appartient) ;
    - Débit d'exploitation en m^3/h : négatif dans le cas d'un pompage, positif dans le cas d'une injection ;
    - Date de mise en service ;
    - Date d'arrêt de fonctionnement.
- Une table « GRADIENT » décrivant les propriétés physiques du milieu utilisées dans les calculs d'impacts :
    - Gradient de nappe
    - Perméabilité
    - Direction d'écoulement souterrain
- Une table « GEOMETRIE » décrivant la géométrie de l'aquifère :
    - Position du toit de l'aquifère
    - Position du mur de l'aquifère
    - Epaisseur saturée de l'aquifère
    - Piézométrie de référence de l'aquifère
    - Porosité,
    - Transmissivité
    - Débit d'exploitation maximum autorisé
    - Zones où l'exploitation n'est pas envisageable (mailles d'exclusion).

L'outil de calcul proprement dit est transposable à n'importe quel aquifère tandis qu'une base de donnée propre à chaque aquifère considéré devra être établie.

2.2.2. Mise en ligne de l'outil : analyse de faisabilité

Afin de rendre accessible via internet l'outil d'évaluation des impacts de la géothermie dit « prototype 2 » développés sous ARC GIS 10 à partir d'un algorithme élaboré en langage VisualBasic (VBA), la Direction des Systèmes d'Information du BRGM a été missionnée pour :

- Traduire l'algorithme de calcul dans un langage compatible avec une mise en ligne ;
- Proposer et tester une solution de mise en ligne de type « tout web », c'est-à-dire sans stockage de données sur le poste utilisateur : l'intégralité des constituants de l'outil (module de calcul et données utilisées pour les calculs) sont stockés sur un serveur BRGM et intérogés via une interface web. Aucun hébergement permanent de données n'est prévue, que ce soit celles introduites par l'utilisateur ou celles générées par l'outil de calcul. Une fois la simulation réalisée, les éléments sont stockés temporairement puis supprimés dès la simulation suivante. Une possibilité de sauvegarde des scenarios d'exploitation établis pour réaliser les calculs d'impact est néanmoins possible sur le poste utilisateur (en format texte).

La synthèse des travaux réalisés est présentée ci-dessous.

Elaboration du module de calcul de l'outil au format web

• *Transposition du code existant*

L'algorithme de calcul existant est programmé sous forme de module VBA pour ArcGIS dans la version SIG de l'outil. La logique de calcul a été reprise et transposée en C#.NET (v4.0) dans une librairie indépendante et réutilisable (GTH Lib).

• *Architecture des composants*

L'algorithme de calcul est associé à une interface utilisateur et à une base de données pour constituer une application web complète (web service).

Lorsqu'un utilisateur demande un calcul d'impact sur des points préalablement placés sur la carte, une requête est envoyée au service web qui embarque un module chargé du calcul (GTH Lib). Le service pilote ce module et stocke la représentation géométrique des résultats dans une base de données de type PostGIS. Le stockage des résultats en base de données est nécessaire dans un souci de performances.

Cette base est organisée sous forme de quatre tables de données :

- table « Grille » décrivant la géométrie du maillage

- table des paramètres de calcul (répartis selon un maillage de l'aquifère) et des paramètres environnementaux ;

- table des résultats de calculs.

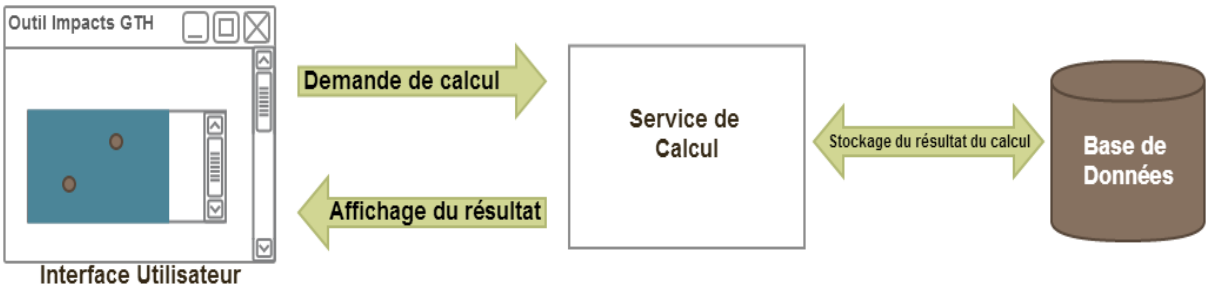

Figure 1 : Architecture schématique de l'outil web

- ***Fonctionnement***

Le code ou librairie de calcul créé (GTH Lib) et intégré dans le WebService prend en entrée une série d'ouvrages paramétrés par l'utilisateur. Ces paramètres (non stockés dans la base PostGIS) comprennent :

- Les coordonnées X-Y de l'ouvrage
- La date de début et de fin d'activité de l'ouvrage
- Le débit de l'ouvrage

Il prend également en entrée les paramètres de la simulation décrits par l'utilisateur (non stockés dans la base) : date de début de la simulation, durée de la simulation, pas de temps de restitution des résultats.

Les paramètres du milieu utilisés pour le calcul stockés dans la base de données PostGIS (table « ParamMilieu ». Ces paramètres comprennent :

- La vitesse d'écoulement souterrain
- La direction d'écoulement souterrain
- La porosité
- La transmissivité
- L'épaisseur saturée de l'aquifère

Le résultat du calcul est bancarisé temporairement dans la base de données PostGIS (table « Résultats »). Il est effacé de la base au lancement d'une nouvelle simulation. La présentation du résultat se fait grâce à un MapServer connecté à cette base PostGIS.

Le résultat de sortie du WebService est composé :

- De l'identifiant du calcul effectué ;
- Des coordonnées de la zone calculée ;
- De la perturbation des lignes de courant induite par les ouvrages pris en compte dans le calcul : résultat uniquement catographique ;
- Du déplacement du front thermique dans le temps : résultat sous forme numérique ;
- Du rabattement (ou surcote) de nappe : résultat sous forme x, y, valeur.

Elles sont restituées à l'utilisateur sous forme d'un tableau de données apparaissant à l'écran à partir d'un clic sur le point de restitution.

Démonstrateur Web

Un démonstrateur Web de l'outil a été créé. Il reprend la charte des sites web satellites du BRGM et intègre une carte permettant de visualiser les résultats des calculs effectués avec le module de calcul.

Le fond de carte correspond au scan 25 IGN. La limite d'extension de l'aquifère considéré est également reportée.

Les forages répertoriés en BSS sont visibles à l'écran.

Il est disponible à l'adresse suivante : http://impactgth.brgm-rec.fr/GTH/

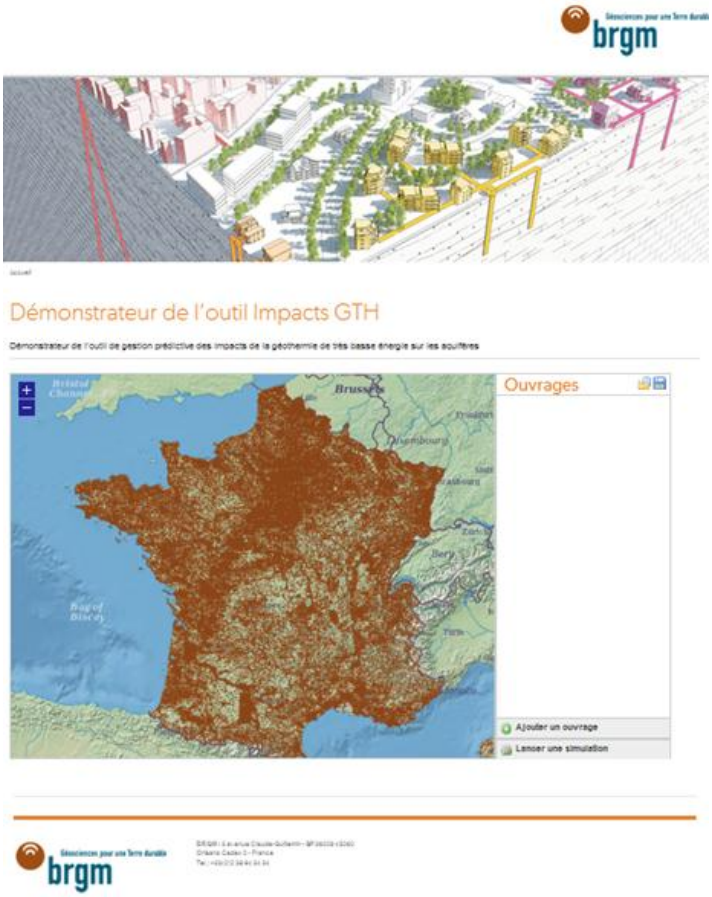

Figure 2 - Interface du démonstrateur web

- **Fonctionnement**

L'interface se découpe en deux parties. Une partie cartographique située à gauche présentant une espace permettant de définir les positions des ouvrages de manière manuelle et de visualiser les résultats de la simulation. Une partie Ouvrages à droite, permettant d'ajouter des ouvrages, de visualiser la liste des ouvrages ajoutés pour éventuellement en modifier les caractéristiques ou bien en supprimer, et enfin une option pour lancer une simulation.

- **Manipulation des ouvrages**

Le bouton *Ajouter un ouvrage* permet d'ajouter un ouvrage au centre de la carte. L'utilisateur peut ensuite déplacer cet ouvrage de deux façons, soit en effectuant un

glisser/déposer directement sur la carte en cliquant sur l'ouvrage, et en le déplaçant sans relâcher le bouton de la souris, puis en relâchant le bouton de la souris lorsque la position de l'ouvrage est celle désirée ; soit en entrant directement les coordonnées de l'ouvrage dans les entrées *X* et *Y* du formulaire de l'ouvrage, puis en cliquant sur le bouton *Mettre à jour l'ouvrage*.

Figure 3 - Bouton Ajouter un ouvrage

Pour modifier les caractéristiques d'un ouvrage, l'utilisateur doit changer les valeurs des entrées du formulaire attaché à l'ouvrage (coordonnées géographiques, débit, date d'entrée en service, date de mise hors service, épaisseur d'aquifère). Le pictogramme *Attention* indique à l'utilisateur que les modifications qu'il a effectué ne sont pas encore prises en compte, nécessitant ainsi un appuie sur le bouton *Mettre à jour l'ouvrage*.

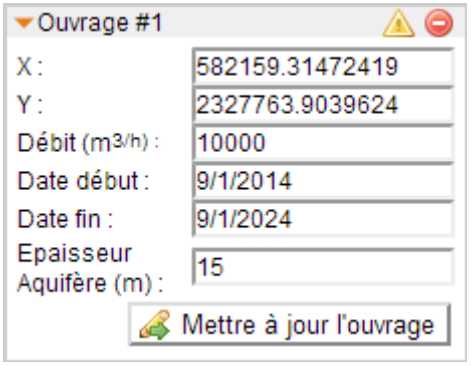

Figure 4 - Modification d'un ouvrage

Le pictogramme *Effacer* permet de supprimer un ouvrage.

- **Lancement d'une simulation**

Le bouton *Lancer une simulation* permet de lancer une simulation prenant en compte tous les ouvrages ajoutés. Cependant, les ouvrages qui possèdent des modifications en cours (pictogramme *Attention*) seront utilisés avec leurs valeurs précédentes.

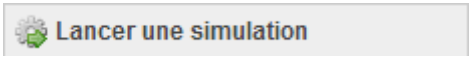

Figure 5 - Bouton Lancer une simulation

Le résultat de la simulation peut ensuite être visualisé dans l'espace cartographique. Sont visibles :

- les déformations des lignes de courants de l'aquifère (branches partant de chaque forage) ;
- les valeurs de rabattement/surcote et de déplacement du front thermique par clic sur les points de restitution des résultats.

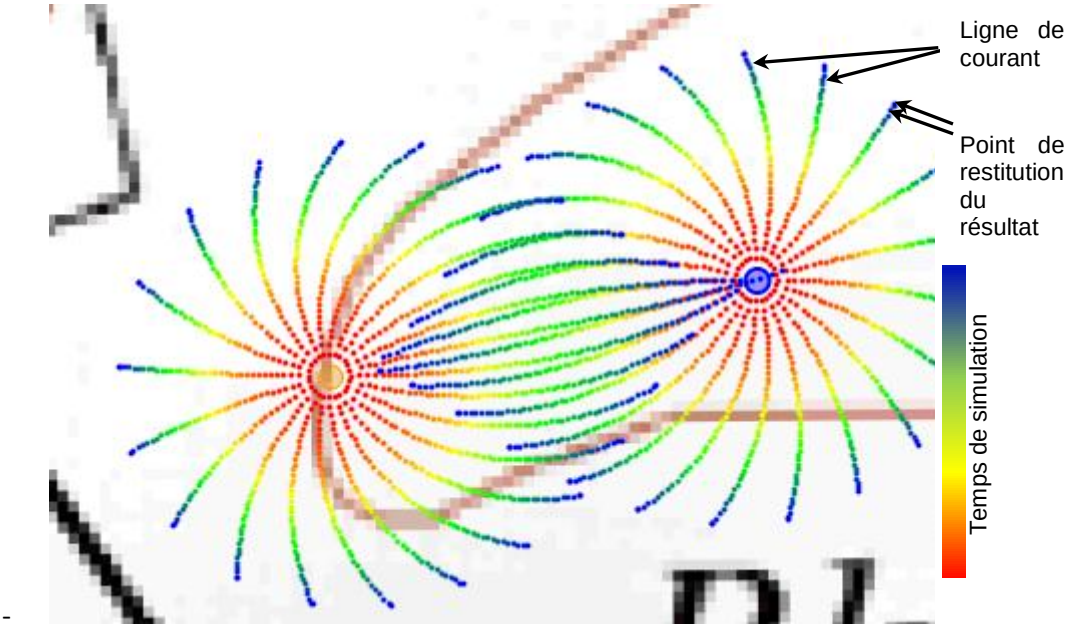

Figure 6 - Résultat d'une simulation dans l'espace cartographique

Faisabilité de la mise en ligne

Le démonstrateur a permis de valider la faisabilité de la mise en ligne de l'outil Impacts GTH, avec quelques avantages par rapport à la version actuelle développée dans l'environnement logiciel d'ArcGIS:

- Du fait du langage et de la source de données utilisés, les performances s'en sont trouvées améliorées. Les calculs d'impacts sont plus rapides ; pour exemple, le calcul présenté en Figure 7 et faisant intervenir 21 ouvrages est réalisé en 7 secondes ;
- Les mises à jour de l'outil seront simplifiées : elles seront centralisées puisque l'outil est hébergé sur un serveur central et ne devront pas être déployées sur chaque poste utilisateur ;
- Il sera possible de partager les paramètres d'une simulation grâce à l'enregistrement de ceux-ci sous forme de fichier ;
- Certains paramètres de calcul sont préconfigurés et non modifiables par les utilisateurs, tel qu'indiqué dans la partie « Fonctionnement » du point 2.2.2. Cela permet de contrôler les paramètres de simulation afin de garantir leur pertinence.

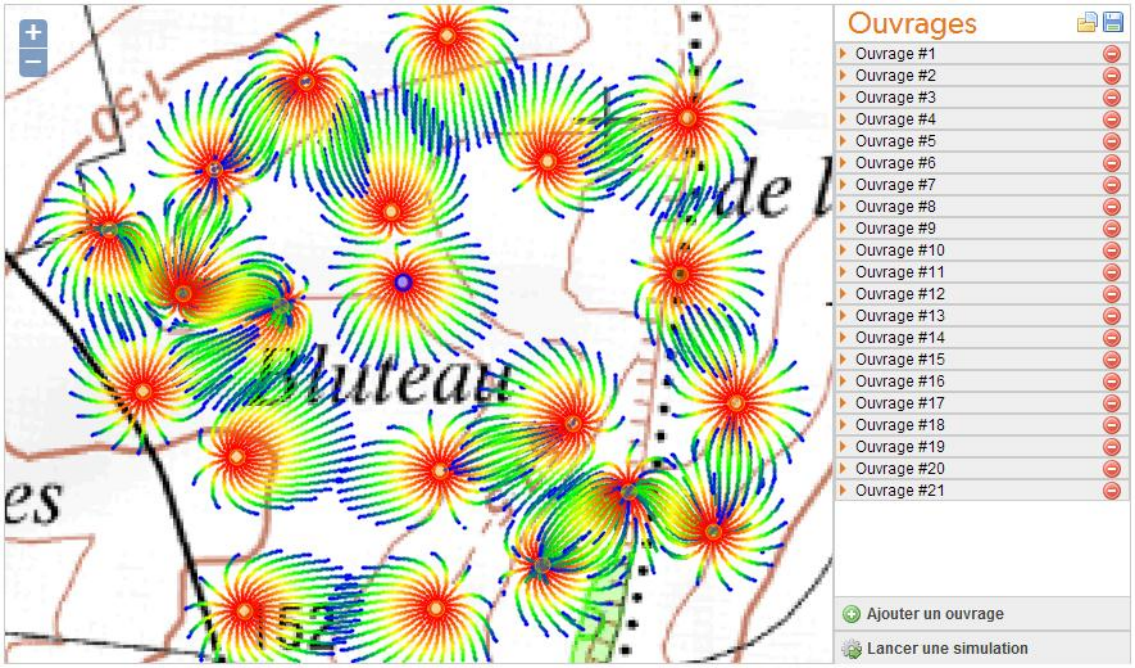

Figure 7 : Résultat d'un scenario test à 21 ouvrages en service

3. Outils de gestion prédictive d'aquifères à forte densité d'exploitations de basse énergie

3.1. INTRODUCTION

Le dimensionnement d'une opération de géothermie en aquifère superficiel ou profond est réalisé par la modélisation des impacts hydrauliques et thermiques de l'opération dans son environnement. Si le traitement par méthode numérique est le plus souvent indispensable du fait de la nature hétérogène du réservoir et des conditions aux limites, il est souvent utile de pouvoir accéder rapidement à des premiers ordres de grandeur sur les impacts hydrauliques et thermiques. Le présent chapitre décrit l'implémentation d'un code de calcul en langage « Python » pour l'écoulement permanent et le transport de chaleur en transitoire dans un aquifère lors du pompage et de la réinjection d'un fluide à une température différente de celle de l'aquifère. Le tracé des lignes de courant, du déplacement du front thermique et la température au puits de production sont déterminés dans l'hypothèse de la convection pure dans l'aquifère. Ce programme est développé sur la base de la solution analytique proposée par Gringarten, Landel et Sauty (1974, 1975, 1978).

3.2. DESCRIPTION DU MODÈLE MATHEMATIQUE

3.2.1. Conditions de validité du modèle

1. L'aquifère est supposé homogène, isotrope et d'une épaisseur uniforme dans le plan horizontal. Les épontes au-dessus et en dessous de l'aquifère sont supposées imperméables à l'écoulement et d'étendue infinie dans la direction verticale. Le système est donc symétrique par rapport au plan médian de l'aquifère.
2. Le débit est supposé être constant, et le régime hydraulique permanent est atteint de façon quasi instantanée. Le champ d'écoulement du fait du pompage et de la réinjection aux puits se superpose au gradient hydraulique dans l'aquifère.
3. Initialement l'aquifère et ses épontes imperméables sont à la même température (en fait, les températures ne sont pas identiques en raison du gradient géothermique, mais celui-ci peut être négligé, car nous nous intéressons uniquement aux perturbations de la température dans l'aquifère). La température de réinjection en un puits est constante dans le temps.
4. Les propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique) de l'aquifère sont constantes. Les effets densitaires et de viscosité du fluide sont négligés.
5. Le transfert de chaleur dans l'aquifère se fait uniquement par convection (conduction et dispersion thermique sont négligées).
6. Le transfert de chaleur dans les épontes se fait uniquement par conduction verticale.

3.2.2. Description du problème mathématique

Etant donné les hypothèses ci-dessus, le champ (permanent) des vitesses du fluide est d'abord calculé de manière analytique par la méthode du potentiel complexe qui fournit les équipotentielles du champ d'écoulement et les fonctions de courant associées (chapitre 3.3). Il est ensuite possible de traiter indépendamment chaque tube de courant provenant d'un puits d'injection. La température correspondant à un tube de courant donné, délimité par deux lignes

de courant ψ et $\psi + \Delta\psi$, peut être décrite par une fonction unidimensionnelle dans l'aquifère $T_w^{\psi}(S,t)$ et par une fonction à deux dimensions $T_R^{\psi}(S,z,t)$ dans les épontes, S étant la surface comprise entre le point courant M à l'instant t du tube de courant et le point d'injection I (Figure 8). S est ainsi utilisé pour paramétrer la fonction de courant et sert de coordonnée le long de celle-ci.

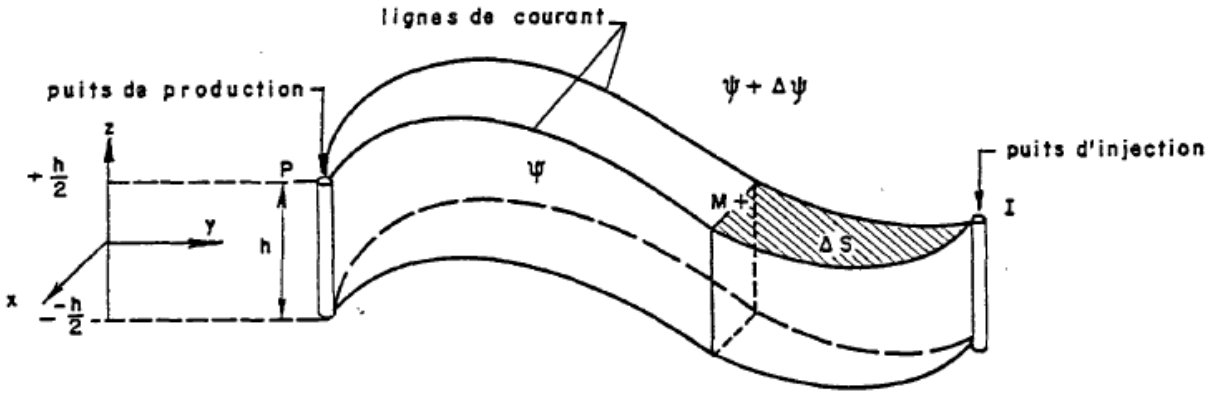

Figure 8 : Schéma illustrant un tube de courant reliant un puits injecteur et producteur (d'après Gringarten et Sauty, 1975)

L'équation différentielle régissant la température de l'eau dans un tube de courant est obtenue par l'écriture du bilan thermique sur un élément du tube compris entre les surfaces S et $S + \Delta S$ (équation 1).

Soit :

$$\underbrace{\rho_A C_A h \Delta S\left[T_w^{\psi}(S,t+\Delta t) - T_w^{\psi}(S,t)\right]}_{\text{variation temporelle local du stock de chaleur dans le volume d'aquifère } h\Delta S} = \underbrace{\rho_F C_F q\left[T_w^{\psi}(S,t) - T_w^{\psi}(S+\Delta S,t)\right]}_{\text{bilan des flux d'énergie transporté par le fluide au débit q entrant à l'abscisse S et sortant en } S+\Delta S} + \underbrace{2K_R \frac{\partial T_R^{\psi}(S,z,t)}{\partial z}}_{\text{contribution diffusive des 2 épontes}}$$

Qui en faisant tendre ΔS et Δt vers 0 donne :

$$h\rho_A C_A \frac{\partial T_w^{\psi}(S,t)}{\partial t} + q\rho_F C_F \frac{\partial T_w^{\psi}(S,t)}{\partial S} = 2K_R \frac{\partial T_R^{\psi}(S,z,t)}{\partial z} \quad (1)$$

Le premier terme à gauche représente donc le stockage de la chaleur, le second terme les flux entrant et sortant par convection et le terme à droite quantifie les pertes thermiques par conduction vers les deux épontes. On a noté :

- q le flux passant à travers le tube de courant, délimité par les lignes de courant ψ and $\psi + \Delta\psi$ [m^2/s],
- $T_w^{\psi}(S,t)$ la température dans l'aquifère en un point M d'abscisse S [°C],
- $T_R^{\psi}(S,z,t)$ la température des épontes à l'altitude z, à la verticale du point d'abscisse S [°C],
- h -l'épaisseur de l'aquifère [m],
- $\rho_A C_A$ la capacité calorifique volumique de l'aquifère [J/m^3/°C],
- $\rho_F C_F$ la capacité calorifique volumique du fluide [J/m^3/°C],
- K_R conductivité thermique des épontes [W/m/°C].

Si l'on néglige les pertes thermiques dans les épontes, on a alors un front thermique abrupt de type « piston » se déplaçant à la vitesse $\frac{\rho_F C_F}{\rho ACA} \times \frac{q}{h}$ où $\frac{q}{h}$ la vitesse apparente du fluide (vitesse de Darcy).

Le front thermique est ainsi ralenti d'un facteur $\frac{\rho_F C_F}{\rho ACA}$ par rapport à la vitesse de Darcy (vitesse de filtration) et d'un facteur $\frac{\rho_F C_F}{\rho ACA}\phi$ par rapport à la vitesse réelle du fluide, avec ϕ la porosité de l'aquifère.

Dans le cas où la chaleur peut diffuser dans les épontes, le front ne sera plus abrupte : le refroidissement (ou réchauffement) de l'aquifère sera retardé (zone de transition entre la température initiale et la température de réinjection) du fait du refroidissement (ou réchauffement) progressif des épontes ***(figure 8)***.

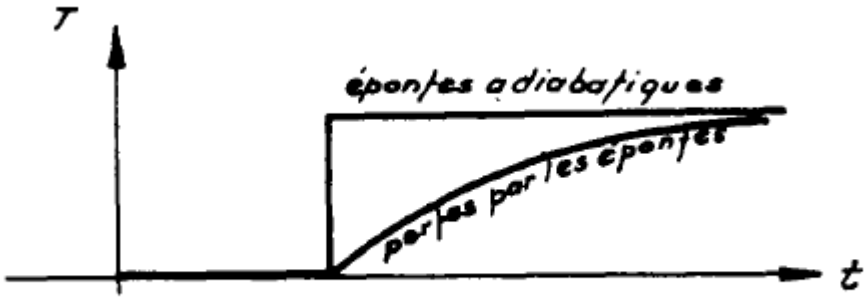

Figure 9 : Schéma d'évolution de la température en un point de l'aquifère avec et sans pertes thermiques dans les épontes (d'après Landel et Sauty, 1978). Si il n'y a pas diffusion au sein de l'aquifère les points de raccordement des deux courbes à l'axe des abscisses concordent.

3.2.3. Expression de la température en un point de l'aquifère

La température en un point de l'aquifère à l'instant t est donnée par (Gringarten, Landel et Sauty, 1974) :

$$\frac{T_w^{\psi}(S,t)-T_0}{T_i-T_0} = erfc\left[\frac{(\rho_F C_F)^2}{K_R \rho_F C_F}\left(\frac{q d\psi}{dS}\right)\left(t - t_{front}\right)\right]^{-1/2} \quad (2)$$

Cette équation est obtenue en considérant un tube de courant infiniment mince limité par les lignes de courant ψ et $\psi + d\psi$ et de surface dS entre le puits de réinjection et le point considéré. t_{front} désigne la date d'arrivée du front thermique en ce point.

$$t_{front} = \frac{\rho_A C_A}{\rho_F C_F} \times \frac{h}{q} \times \frac{dS}{d\psi}$$

En posant les grandeurs adimensionnelles suivantes :

$$T_D = \frac{T_w^{\psi}(S,t) - T_0}{T_i - T_0}$$

$$t_D = \frac{\rho_F C_F}{\rho_A C_A} \times \frac{q}{hD^2} \times t = \frac{dS_D}{d\psi}\frac{t}{t_{front}}$$

avec : $dS_D = \frac{dS}{D^2}$

$\Lambda = \frac{\rho_F C_F \times \rho_A C_A}{K_R \rho_F C_F} \times \frac{qh}{D^2}$

On peut alors calculer la température au puits de production en appliquant la loi des mélanges sur les lignes de courant arrivant aux puits à l'instant t_D:

$$T_D = \int_{\psi_{min}}^{\psi_{max}} Erfc\left\{\frac{dS_D}{d\psi} \times \left[\Lambda\left(t_D - \frac{dS_D}{d\psi}\right)\right]^{-1/2}\right\} d\psi \qquad (3)$$

Le paramètre Λ dans l'équation 3 caractérise les échanges thermiques avec les épontes semi-infinies (cf. Figure 9).

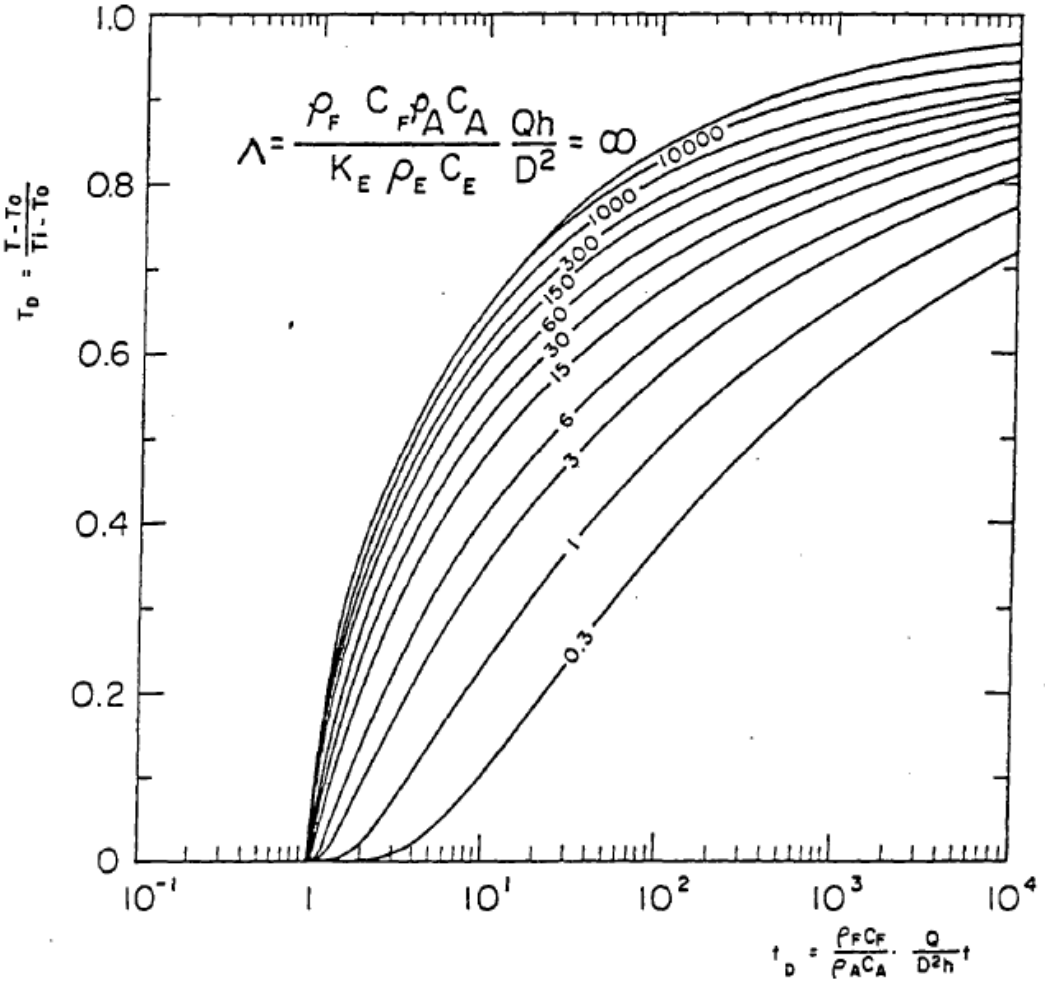

Figure 10 : Courbe de recyclage d'un doublet thermique en fonction de la contribution des épontes (d'après Landel et Sauty, 1978)

3.3. CALCUL DU CHAMP D'ECOULEMENT

3.3.1. Définition de la fonction potentiel complexe et vitesse complexe

Dans le cas d'un aquifère ayant une conductivité hydraulique constante, uniforme et isotrope on peut définir la fonction potentielle par :

$$\varphi = Kh \tag{4}$$

Avec $h = \frac{p}{\rho g} + z$ la charge hydraulique.

Dans ce cas la loi de Darcy et l'équation de diffusion en permanent peuvent respectivement s'écrire (fluide incompressible) :

$$U = -\nabla\varphi \tag{5}$$

$$\nabla^2\varphi = 0 \tag{6}$$

φ est donc une fonction harmonique et il existe une fonction holomorphe dont elle est la partie réelle. On appelle ***fonction potentielle complexe de l'écoulement*** cette fonction définie par :

$$\Gamma(z) = \varphi(z) + i\psi(z) = \varphi(x,y) + i\psi(x,y) \tag{9}$$

Où la fonction ψ, appelée fonction de courant, vérifie les conditions de Cauchy :

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} \tag{7}$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial y} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \tag{8}$$

La fonction de vitesse complexe est définie par :

$$v(z) = \frac{d\Gamma(z)}{dz} \tag{10}$$

$$v(z) = u - iv \tag{11}$$

Où u et v sont les composantes du vecteur vitesse et définies par :

$$u = \frac{\partial\psi}{\partial y} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \tag{12}$$

$$v = -\frac{\partial\psi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi}{\partial y} \tag{13}$$

3.3.2. Expression du potentiel complexe de l'écoulement

La fonction potentielle complexe permet de calculer des champs d'écoulement complexes par superposition d'écoulements élémentaires (addition des fonctions complexes de chaque type d'écoulement plan). Ainsi, dans le cas de l'exploitation géothermique avec une multitude de puits, la fonction potentielle complexe s'écrit :

$$\Gamma(z) = \sum_i \frac{Q}{2\pi h}\log(z - z_i) \tag{14}$$

i est l'indice du puits considéré,

z_i la localisation dans le plan complexe du puits,

Q le débit, positif pour un puits de réinjection ou négatif pour un puits de production,

h l'épaisseur de l'aquifère.

Par ailleurs, afin de tenir compte de l'écoulement régional qui peut être important pour les aquifères superficiels contrairement aux aquifères captifs profonds où il est souvent négligé, on considère le cas général de l'expression de la fonction potentielle :

$$\Gamma(z) = Uz + \sum_i \frac{Q}{2\pi h} \log(z - z_i) \quad (15)$$

$$U = v_0 e^{-i\beta} = v_0(cos\beta - isin\beta) \quad (16)$$

Avec v_0 le module de la vitesse et β l'angle par rapport à l'axe des x mesuré dans le sens trigonométrique (Figure 11)

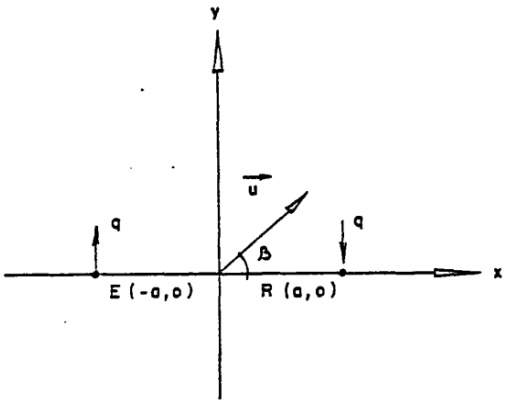

Figure 11 : Exemple d'un doublet avec superposition de l'écoulement naturel de la nappe

3.3.3. Calcul du champ d'écoulement

Avec les principes énoncés précédemment on peut calculer le champ d'écoulement entre plusieurs puits à partir de la fonction de courant $\psi(z)$ définie comme la partie imaginaire de la fonction potentielle complexe. Le programme consiste à calculer une suite de points z_j^k telle que :

$$\forall\, k \in \{0, \dots, n\}\ \ \psi\left(z_j^k\right) = \psi_j = cste \quad (17)$$

Pour se faire en chaque point z_j^k on considère la normale unitaire n_j^k à la ligne de courant ψ_j et définie par:

$$n_j^k = \frac{\nabla \psi_{z_j^k}}{\left\| \nabla \psi_{z_j^k} \right\|} \quad (18)$$

$$\nabla \psi_{z_j^k} = \begin{bmatrix} \left.\frac{\partial \psi}{\partial x}\right|_{z_j^k} \\ \left.\frac{\partial \psi}{\partial y}\right|_{z_j^k} \end{bmatrix} \quad (19)$$

La tangente à la ligne de courant est alors définie par:

$$t_j^k = \pm i n_j^k \quad (20)$$

Suivant le sens de parcours de la ligne de courant.

On construit alors les différents points le long de la ligne de courant ψ_j de la manière suivante :

$$z_j^{k+1} = z_j^k + \Delta t_j^k \tag{21}$$

Où Δ est l'incrément pour avancer le long de la tangente. Ce dernier est pris suffisament faible pour approcher correctement la courbe.

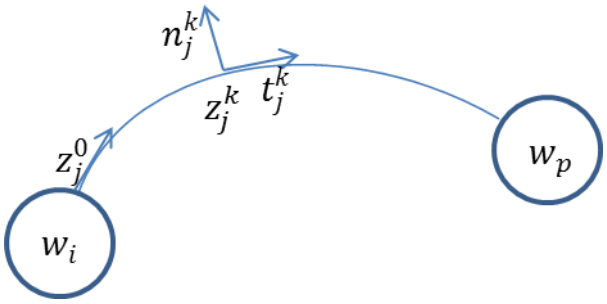

Figure 12 : Schéma de principe du construction d'une ligne de courant

Par ailleurs le programme nécessite de définir les points de départ et d'arrêt pour chaque ligne de courant. Les puits dans le plan complexe sont représentés par des cercles dont le centre a pour affixe w_k et de rayon r_k. Chacun de ces puits peut donc être défini par :

$$W_k = \{z \in \mathbb{C} \mid |z - w_k| = r_k\} = \{w_k + r_k e^{i\theta} | \theta \in \mathbb{R}\} \tag{22}$$

Le point de départ se situe sur un puits injecteur tel que :

$$z_j^0 = w_i + r_i e^{i\theta} \tag{23}$$

$$\psi(z_j^0) = \psi(w_i + r_i e^{i\theta}) = \psi_j \tag{24}$$

Le point d'arrêt de la ligne de courant ψ_j est tel qu'il existe un puits w_p tel que:

$$|z_j^n - w_p| \leq r_p \tag{25}$$

On définit alors comme étant le dernier point de la ligne de courant le point :

$$z_j^n = w_p + r_p e^{i\theta} \tag{26}$$

$$\psi(w_p + r_p e^{i\theta}) = \psi_j \tag{27}$$

Le programme procède ainsi ligne par ligne en parcourant l'ensemble des puits injecteurs. Le calcul du champ d'écoulement sera d'autant plus précis qu'on augmente le nombre de ligne de courant à calculer partant de chaque injecteur et que l'incrément Δ le long d'une ligne de courant est faible. La Figure 13illustre des exemples de calcul du champ d'écoulement pour deux doublets juxtaposés et différentes valeurs et directions de l'écoulement régional.

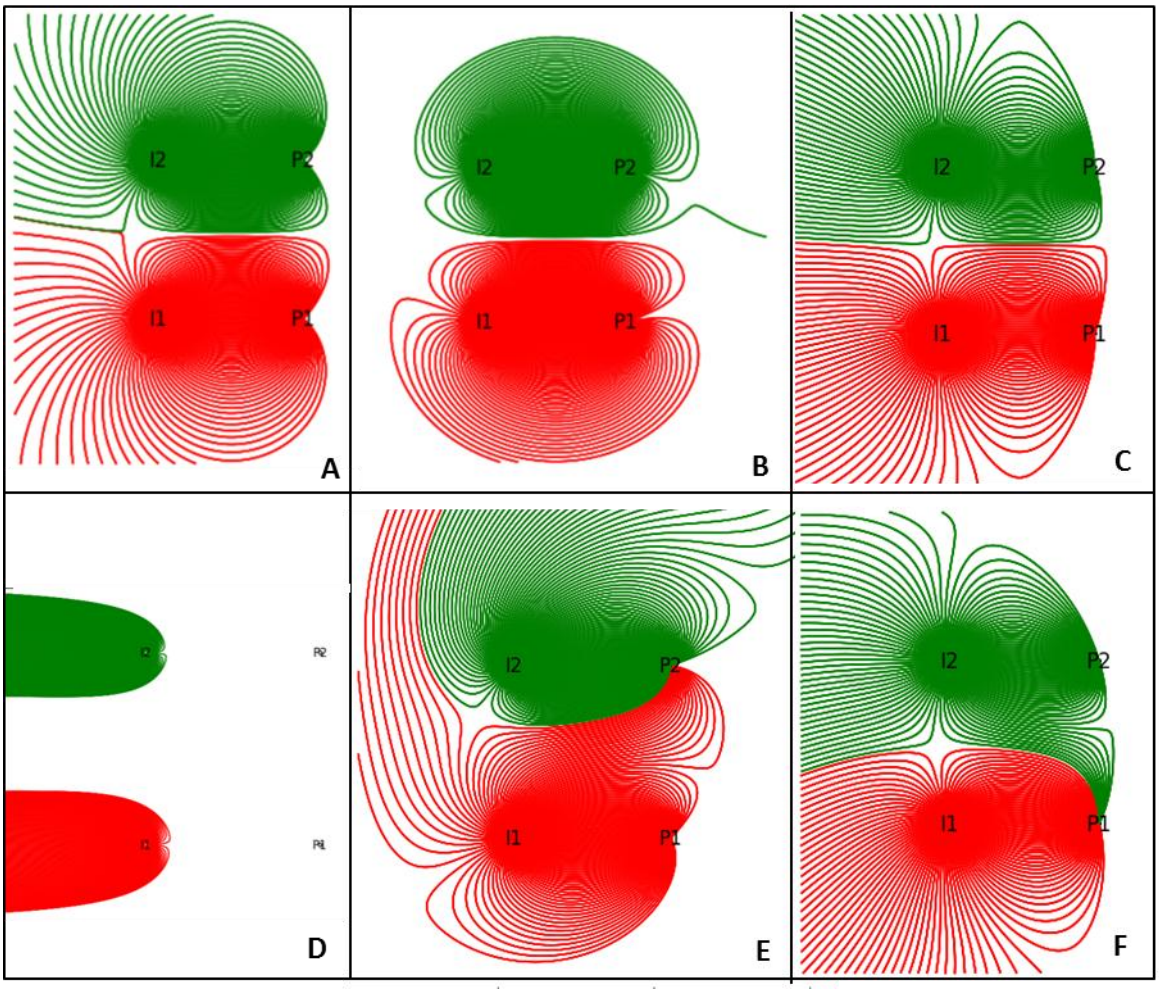

Figure 13 : Exemple du champ d'écoulement dans le cas de deux doublets et pour différentes configurations (A :pas d'écoulement régional, B :avec écoulement régional ($\beta = 0, vo = 1{,}4e-7m/s$), C :avec écoulement régional ($\beta = 180, vo = 1{,}4e-7m/s$), D : avec écoulement régional ($\beta = 180, vo = 1{,}4e-5m/s$), E : avec écoulement régional ($\beta = 50, vo = 1{,}4e-7m/s$), F : avec écoulement régional ($\beta = 210, vo = 1{,}4e-7m/s$)

3.4. CALCUL DES ISOCHRONES ET DE LA TEMPERATURE DE PRODUCTION

3.4.1. Calcul des isochrones

Une fois le champ d'écoulement déterminé il est possible de calculer le déplacement au cours du temps du front thermique. Pour ce faire il est nécessaire de déterminer le temps de parcours d'une particule de froid le long d'une ligne de courant. Chaque ligne de courant étant définie par une série de points $z_j^k k \in \{0, \dots, n\}$, on peut calculer le temps écoulé entre chaque position successive:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\Delta v}$$

$$\Delta l \sim \left\| z_j^{k+1} - z_j^k \right\|$$

$$\Delta v \sim \frac{v_j^{k+1} + v_j^k}{2}$$

$$avec\ v_j^k = \frac{d\Gamma_j^k}{dz}$$

Ces approximations sont correctes si on considère un incrément Δ infinitésimal. Une fois que l'on a calculé les temps associés à chaque point qui constitue la ligne de courant, on peut tracer pour un pas de temps τ donné les contours d'isovaleurs reliant chaque point à l'instant τ et définissant l'avancée progressive du front thermique.

$$z_\tau = \frac{\tau - t_{z^k}}{t_{z^{k+1}} - t_{z^k}} z^{k+1} + \frac{t_{z^{k+1}} - \tau}{t_{z^{k+1}} - t_{z^k}} z^k \quad (28)$$

La figure 13 montre un exemple de champ d'écoulement sur lequel on a tracé les isochrones (pas de 3 ans) pour deux doublets géothermiques et ayant les caractéristiques suivantes :

Paramètres	Valeur	Unité
Epaisseur de l'aquifère	20	m
Débit doublet 1 (I1,P1)	200	m3/h
Débit doublet 2 (I2,P2)	150	m3/h
Porosité	0.15	
Température initial	70	°C
Température de réinjection	40	°C
Vitesse écoulement régional	1.4e-7	m/s
Direction écoulement	150	°
Capacité calorifique de l'eau	4.2e6	J/m3/°C
Capacité calorifique de la roche	2.1e6	J/m3/°C

Tableau 1 : Paramètres du modèle

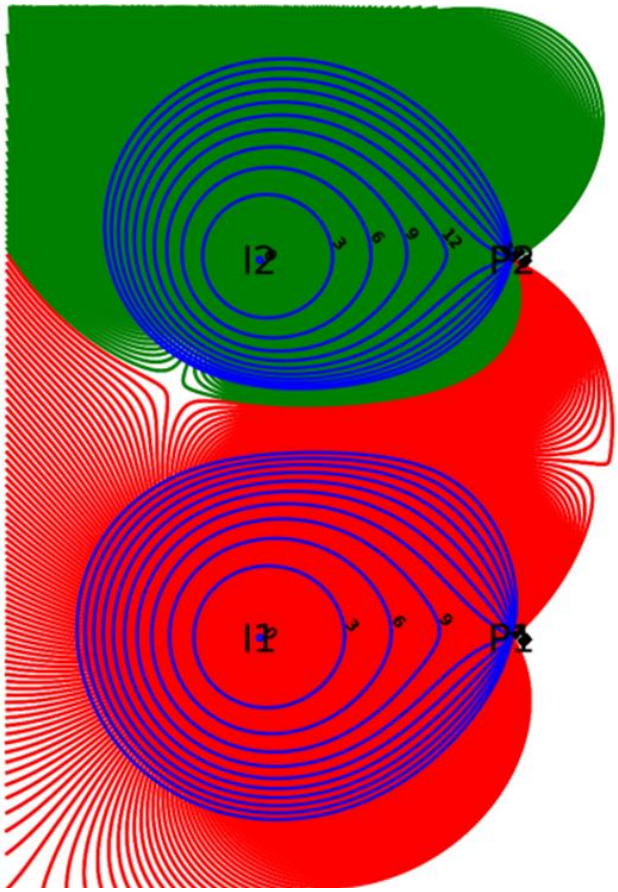

Figure 14 : Exemple de tracé des isochrones superposés au champ d'écoulement pour deux doublets

3.4.2. Calcul de la température de production

Afin de calculer l'évolution de la température aux puits de production, il faut déterminer dans un premier temps quelles sont les lignes de courant qui ont atteint le puits de production à un instant donné et à quel injecteur elles appartiennent. La contribution du débit d'un puits injecteur au débit pompé à un instant donné est :

$$Q_i = \frac{Q}{n_{inj}} \times n_{prod} \tag{29}$$

n_{inj} est le nombre de lignes de courant partant d'un injecteur

$\frac{Q}{n_{inj}}$ est le débit transitant par chaque tube de courant

n_{prod} est le nombre de tubes ayant atteint le puits producteur

La température au puits de production s'obtient alors en utilisant la loi des mélanges sur les filets de fluide arrivant à un puits de production :

$$T_P = \frac{\sum_i (Q_i \times T_i) + (Q_P - \sum_i Q_i) \times T_0}{Q_P} \tag{30}$$

Q_i est la contribution de débit pour un puits injecteur (cf. eq 29)

Q_P est de débit de production

T_i est la température de réinjection au puits injecteur

T_0 est la température initiale de l'aquifère

La figure 14 montre l'évolution de la température de production aux deux puits producteurs des doublets d'après les données du tableau 1.

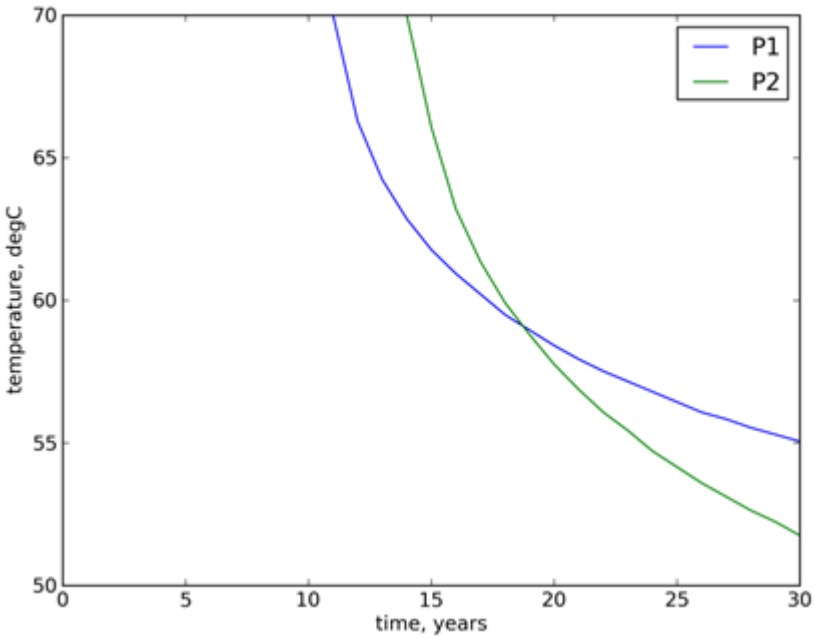

Figure 15 : Evolution de la température de production aux puits d'après les paramètres du tableau 1

3.5. RÉSOLUTION NUMÉRIQUE D'UN MODÈLE CONCEPTUEL

Nous avons également entrepris de développer un second code reposant sur certaines hypothèses conceptuelles retenues dans le modèle précédent, à savoir :

- un écoulement permanent 2D dans l'aquifère,
- un transfert thermique purement convectif dans l'aquifère,
- un transfert thermique diffusif monodimensionnel dans les épontes.

L'écoulement permanent est alors résolu de manière numérique dans l'aquifère ce qui reste très acceptable en termes de temps de calcul mais permet de considérer une transmissivité variable. En réutilisant des développements effectués dans le projet de développement SCOTT de la Direction de la Recherche du BRGM on peut aussi utiliser des solveurs parallèles permettant de considérer des maillages importants tout en gardant des temps de résolution très compétitifs.

Une fois le champ d'écoulement obtenu, les transferts thermiques sont ensuite résolus en transitoire dans l'aquifère et les épontes. La résolution étant également numérique on peut considérer à la fois des épontes semi-infinies et des épontes intermédiaires finies. On obtient alors non seulement l'évolution de la température au niveau des puits de production mais l'état thermique de l'aquifère dans son ensemble. La figure 15 montre l'impact thermique d'un doublet simulé avec ce code de calcul.

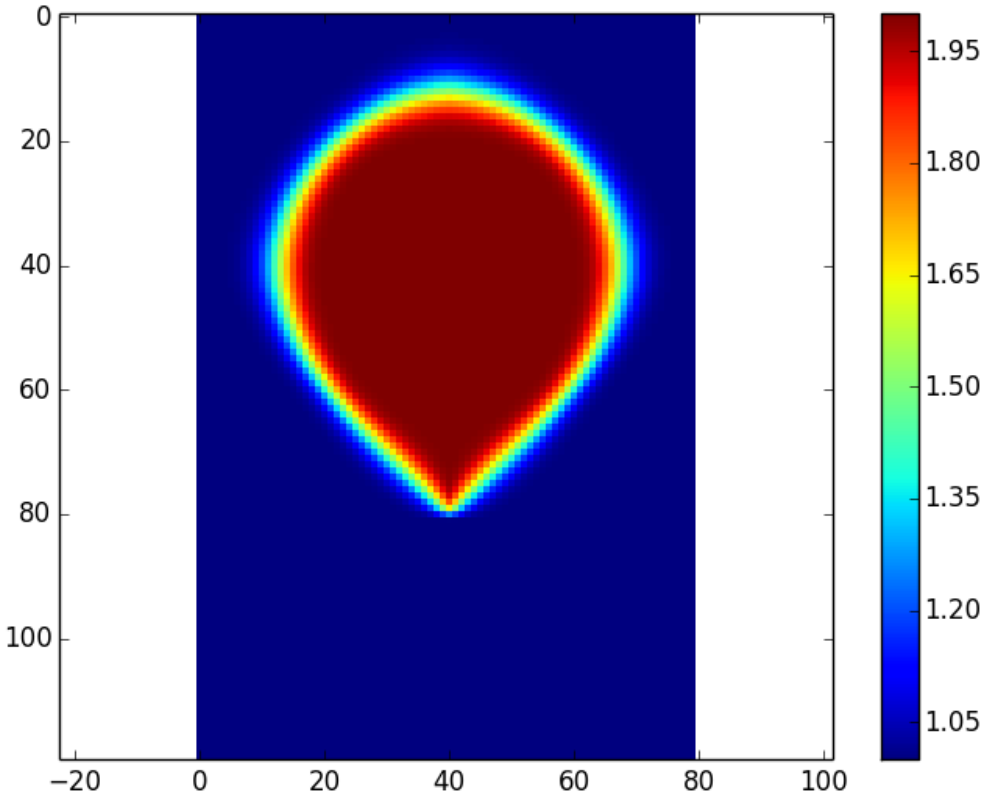

Figure 16 : Impact thermique du fonctionnement d'un doublet sur l'aquifère. Le puits injecteur est situé aux coordonnées (40,40), le puits producteur est positionné aux coordonnées (40,80). La température est représentée en variables adimensionelles.

Ce code est en cours de développement. Ces développements pourront être validés en utilisant la solution analytique précédente. Son achèvement et une description plus détaillée devront faire l'objet d'un prochain projet. Il devra également être validé en utilisant la solution analytique implémenté dans le cadre de ce projet.

4. Conclusion

Face aux besoins de supports décisionnels pour la gestion des ressource énergétiques des aquifères et la prévention des conflits d'usages associés à l'exploitation des eaux souterraines, le BRGM et l'ADEME se sont associés pour étudier la possibilité de développer de nouveaux outils de gestion prédictive des impacts hydrauliques et thermiques de la géothermie de basse à très basse énergie.

Concernant la géothermie de très basse énergie sur aquifères superficiels (nappes libres à forte variabilité hydrodynamique), différents prototypes d'outils avaient été développés depuis 2009. Ils mettaient en œuvre des méthodes de calcul numériques ou analytique couplées à un support cartographique (SIG). La consultation d'utilisateurs potentiels a montré que les outils analytiques présentent un intérêt certain pour les gestionnaires institutionnels des ressources en eaux souterraines comme supports d'aide à la décision : identification d'incompatibilités flagrantes de certains projets avec la préservation de la ressource et de l'exploitation existante ; identification de projets nécessitant des expertises particulières.

En 2013, la poursuite des développements a porté essentiellement sur l'amélioration de l'exploitabilité d'un outil analytique pour des utilisateurs non experts en hydrogéologie ne disposant pas de l'ensemble des données de description des aquifères à gérer avec :

- L'interfaçage de l'outil à une base de donnée decrivant certains paramètres physiques caractéristiques de l'aquifère considéré et nécessaires à l'évaluation des impacts des exploitations géothermiques (piézométrie moyenne, transmissivité, vitesse d'écoulement souterrain, direction d'écoulement souterrain) dans le cadre d'un aquifère monocouche à surface libre. Ces paramètres sont renseignés selon un maillage carré (mailles de 1km de côté) couvrant l'ensemble de l'extension de l'aquifère). La base de donnée crée est propre à chaque aquifère considéré ;

- Un test de la mise en ligne de l'outil analytique a été réalisé et se traduit par la mise à disposition d'un démonstrateur à l'adresse suivante : http://impactgth.brgm-rec.fr/GTH/ . Il devra être complété par un test en situation réelle d'utilisation par une administration bénévole sur un aquifère pilote qui permettra un retour d'expérience sur son utilisation et de nouvelles améliorations.

Concernant les outils plus spécifiques pour la géothermie basse énergie, un code de calcul implémenté en Python relativement « simple » et très peu couteux en temps de calcul a été développé permettant d'accéder très rapidement au champ d'écoulement entre les puits, au tracé des fronts thermiques et de calculer la décroissance thermique aux puits de production. Il repose néanmoins sur un certain nombre d'hypothèses comme un aquifère avec des propriétés homogènes et isotropes (épaisseur, transmissivité) et ne fonctionne que pour un écoulement permanent. Par ailleurs la version actuelle développée du code n'intègre pas à ce stade les échanges thermiques avec les épontes imperméables et donne donc des résultats plutôt pessimistes sur les températures de production (temps de percée plus courts et décroissance plus marquée). L'évolution future sera l'intégration des échanges conductifs avec les épontes. Il pourra alors être proposé comme outil d'évaluation des impacts hydrauliques et thermiques aux bureaux d'études sous-sol en charge des études de

faisabilité lors de la réalisation de nouveaux projets de géothermie sur aquifères captifs profonds ou superficiels. Le développement d'un outil numérique utilisant un modèle conceptuel du réservoir similaire mais incluant l'hétérogénéité en termes d'épaisseur et de transmissivité constituera à terme un outil complémentaire pour une étude préliminaire plus poussée ou une étude d'interactions entre ouvrages

5. Bibliographie

Gringarten A.C., Landel P.A, Sauty J.P (1974) – Programme CADOULAL – Simulation transitoire d'un doublet hydrothermique place dans un écoulement naturel avec fuites thermiques à travers les épontes. Manuel d'utilisation. BRGM 74 SGN 336 GTH

Gringarten A.C. and Sauty J.P (1975) – A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. Journal of Geophysical Research, vol. 80, no 35

Landel P.A. et Sauty J.P. (1978) – Etude de l'influence des caractéristiques physiques de l'aquifère et des roches encaissantes sur la température de l'eau au puitsde production d'un doublet hydrothermique. Rapport BRGM 78 SGN 405 GTH

Naukenova A. (2013) – Development of an analytical tool for predicting the displacement of the thermal front and production temperature decline for geothermal exploitation. Report of internships graduation, ENSG Nancy, July 2013

6. ANNEXES

ANNEXE 1

Méthode de calcul des impacts thermiques et hydrauliques dite des vecteurs vitesse

Les calculs, codifiés dans le SIG, sont réalisés en 3 étapes : calcul du champ de vitesses hydrauliques, puis calcul du positionnement du front thermique, puis calcul des rabattements et surcotes piézométriques.

- **Étape 1 : calcul du champ de vitesses hydrauliques**

Le champ de vitesses hydrauliques résultantes de l'influence des prélèvements/injections réalisés sur l'ouvrage dont on souhaite calculer l'impact, de l'écoulement régional et des prélèvements/injections réalisés sur les ouvrages voisins (cf. Figure 17), est calculé sur un nuage de points répartis autour de l'ouvrage. L'équation permettant le calcul du champ de vitesses hydrauliques est la suivante :

$$V_d' = V_d + \sum_j V_j$$

$$V_j = \frac{Q_j}{2 * \Pi * h * d_j}$$

Équation 1 : Vitesse locale V_d' en fonction de la vitesse de Darcy de l'écoulement régional V_d ($m.s^{-1}$), V_j la composante de la vitesse d'écoulement au point de calcul associée au forage voisin j, Qj le débit du forage j, dj la distance du forage j au point de calcul (m), h l'épaisseur productrice de l'aquifère (m).

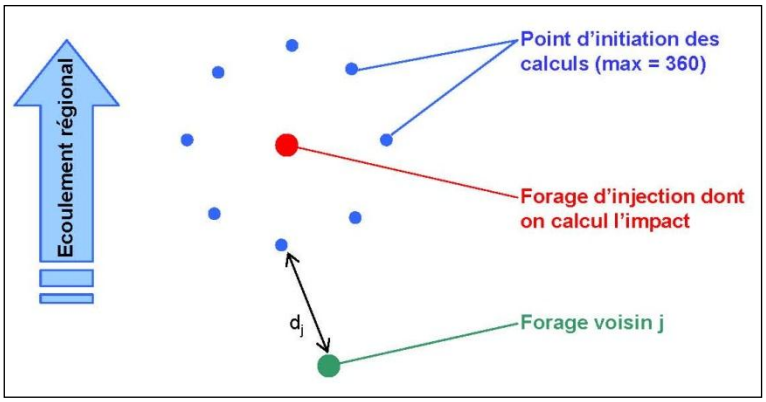

Figure 17 : Mode d'application du calcul analytique.

Les données nécessaires à ce calcul sont issues de différentes sources :

- distance du forage j au point de calcul (d_j) : donnée produite par le SIG ;
- débit du forage j (Q_j) : données fixées par l'utilisateur dans l'interface de gestion des ouvrages ;
- épaisseur productrice de l'aquifère (h) ou épaisseur mouillée : donnée fournie dans la base de données des paramètres du milieu ;
- Vitesse régionale (V_d) : données fournies dans la base de données des paramètres du milieu (calculées à partir des données locales de piézométrie, de perméabilité et d'épaisseur saturée d'aquifère).

- **Étape 2 : calcul du positionnement du front thermique**

Le positionnement du front thermique est calculé, selon le code de calcul ci-dessous, à chaque pas de temps à partir du nuage de points et du champ de vitesse régional (direction générale des écoulements). Les paramètres d'entrée nécessaires à ce calcul sont détaillés ci-dessous.

$$D = V_d' \times \quad t$$

Équation 2 : Distance parcourue par le front thermique (D en m) au bout du pas de temps de calcul t.

Le paramètre « temps de simulation » est renseigné par l'utilisateur dans l'interface de gestion des ouvrages, quand il renseigne la date de fin de fonctionnement de l'ouvrage sur lequel porte le calcul d'impact.

- **Étape 3 : calcul de l'impact hydraulique**

L'impact hydraulique (rabattement provoqué par un prélèvement d'eau souterraine et surcote provoquée par une injection d'eau dans l'aquifère) est évalué à l'aide de l'approximation logarithmique de Jacob :

$$h(D,t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot T \cdot t}{S \cdot D^2}\right)$$

Domaine de validité[2] u >1 00 ; avec $u = \frac{4Tt}{D^2 S}$

Avec :

- h (D, t) : charge de la nappe (niveau d'eau = piézométrie) à la distance D du forage d'exploitation au bout du temps t d'exploitation au débit Q ;
- D : distance au puits d'exploitation où est calculé l'impact ;
- T : transmissivité du milieu ;
- S : coefficient d'emmagasinement.

Équation 3 : Approximation de Jacob - Evaluation des impacts hydrauliques d'une exploitation au débit Q pendant un temps t.

Le calcul est effectué à chaque pas de temps à partir du nuage de points et du champ de vitesse calculé précédemment.

Les données nécessaires à ce calcul sont issues de différentes sources :

- T : paramètre renseigné dans la base de donnée des paramètres du milieu ;
- S : paramètre renseigné dans la base de donnée des paramètres du milieu ;
- D : paramètre issu du calcul de positionnement du front thermique (étape 2 décrite ci-dessus) ;
- t : temps de simulation : renseigné par l'utilisateur dans l'interface de gestion des ouvrages, quand il renseigne la date de fin de fonctionnement de l'ouvrage sur lequel porte le calcul d'impact.

[2] Si le domaine de validité de l'approximation de Jacob n'est pas respecté, le calcul n'est pas réalisé

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34